論　文

モーションキャプチャシステムを用いた物体の動作分析事例

野尻　紘聖* 鍋島　崇統**
柴里　弘毅* 大塚　弘文**

Casa Study for Motion Analysis with Motion Capture System

Kousei Nojiri*, Takato Nabeshima**, Koki Shibasato*, Hirofumi Ohtsuka**

In this paper, we present the motion capture system introduced into Kumamoto National College of Technology in 2011. Motion capture is of interest in many applications such as advanced user interfaces, entertainment, surveillance systems, or motion analysis for sports and medical purposes. In particular, we obtain the efficient measurement for pro-supination, flexi-extension and moving wheelchair with this system.

キーワード：モーションキャプチャ，デジタイズ，動作分析，回内・回外，屈曲・伸展，車椅子
Keywords: motion capture, digitize, motion analysis, pro-supination, flexi-extension, wheelchair

1．緒　　言

モーションキャプチャとは人や物体の 3 次元空間内の動作を計測し，それらの各部分を数値化する技術である [1]. 計測対象各部の座標値の時系列データを正確に取得することが可能であることから，対象の動作を客観的に評価するために利用されている．当初は，おもにコンピュータゲームや映画制作などに利用されたが，近年，スポーツにおける選手間の運動技術の比較や，リハビリテーションにおける回復過程の診断および評価，さらにはロボット機械制御の分野など幅広く役立てられており [1]，今後もさまざま分野での応用が期待されている．また，マイクロソフトから Xbox360 用のゲームデバイスである kinect が発売され，モーションキャプチャの技術は一般にも手軽に体験できるものとなっている．今後も，ますますその技術を活かした製品の開発が行われ，世の中に浸透していくことが予想される．

再編により新設された制御情報システム工学科では，先述の運動解析手法や新しいインターフェース装置の学習をモデルコースの一つバイオメカニクスコースのコアに位置付けており，平成 22 年度の設備整備マスタープランに沿ってモーションキャプチャシステムを導入した．モーションキャプチャシステムには，原理上，大きく分けて光学式，磁気式および機械式の 3 つの方式があるが，計測対象に対する負担が少ないこと考慮した光学式のシステムを採用した．kinect と比較すると，計測精度，範囲，サンプリング周波数が高く，手首の回内・回外運動の動作分析にも十分対応できる性能を備えている．高精度な機器であるがゆえにその精度を引き出すには環境やソフトウェアの設定を適切に行う必要があるが，導入してから日が浅いためノウハウの蓄積が乏しいだけでなく，本システム利用によりで分析できる運動や対象，設備を学内にオープンにしている事実を十分に周知できていないというのが現状である．

本稿では，導入したシステムを用いた動作分析の事例を紹介し，授業および研究でシステムを利用するために必要なノウハウを蓄積することを目的とする．その内容を広く公開することにより，学生に新しい教育環境が提供されること，教職員の研究に寄与すること期待している．

まず，計測精度に影響を与えるキャリブレーションについて実験を行い，キャリブレーションに適したマーカの配置について検討する．次に，人の上肢動作において，比較的狭い範囲での動きと広い範囲での動きの 2 種類の動作について計測実験を行う．これは，授業や研究によって計測環境および範囲が大きく異なることを想定してのことである．狭い範囲での動作の例として前腕の回内・回外および

* 制御情報システム工学科
〒 861–1102　熊本県合志市須屋 2659–2
Department of Control and Information Systems Engineering, 2659–2, Suya, Koshi, Kumamoto 861–1102
** 専攻科
〒 861–1102　熊本県合志市須屋 2659–2
Department of Electronic and Information Systems Engineering, 2659–2, Suya, Koshi, Kumamoto 861–1102

ひじ関節の屈曲・伸展，広い範囲での動作例として車椅子動作時の上肢の動作分析結果を示す．

また，制御情報システム工学科のカリキュラムにおいて，”バイオメカニクス”が5年次通年選択科目として開講される．本科目は生体の構造と機能，運動制御機構と運動学習，生体運動の計測，解析と評価の理解を学習目標としており，本システムを活用した授業展開について述べる．

2. モーションキャプチャ

光学式モーションキャプチャシステムでは，人の動作を計測したいものとした場合，被撮影者の関節などに球形の反射マーカをいくつか取り付ける．また被撮影者を中心に，ライト付きの複数のビデオカメラを配置する．ししてビデオカメラで撮影すると，ライトの発光によりマーカが明るく反射して映り，そのマーカの位置を分析するということになる．
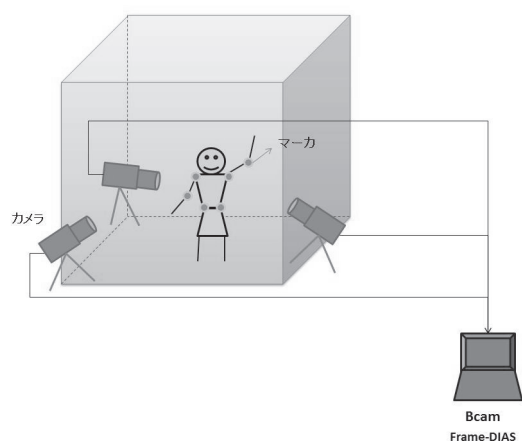
図1　光学式モーションキャプチャ

今回のシステムにおいての具体的な流れは以下のとおりである．

（1）　計測したいもの，その動作の範囲を決定する
（2）　決めた範囲を網羅するように，キャリブレーションの撮影を行う
（3）　3次元計測ソフト Frame-DIAS でキャリブレーションの精度を確認する
（4）　実際に計測したい動作を撮影し，パソコンに取り込む
（5）　3次元計測ソフトで解析する
（6）　計測結果を出力する

2･1 画像・動画の取り込みソフトウェア Bcam

制御情報システム工学科に導入されたモーションキャプチャシステムについて説明する．

3台のIEEE1394の高速カメラを用い，動画の撮影および保存は画像取り込みソフトウェア Bcam で行う．

Bcam の主な動作は，動画の録画・再生・保存である．

録画において，Bcam では外部同期信号によるシンクロ撮影が可能であり，3台のカメラの同時録画開始・録画終了が可能である．必要に応じてシンクロ撮影はオフにすることができ，1台または2台だけのカメラを用いた撮影もできる．また，一秒間で何コマの撮影を行うかの設定が可能である．撮影速度は11パターンから選択ができる．

表1　撮影速度 [Frame/Second]

撮影速度	100	80	60	50	40	30	25	20	15	10	5

また，シャッタースピードを1/50000から設定でき，動きの速い被写体を撮影するときにブレを抑えることができる．さらに，キャリブレーション時に必要である静止画の撮影が行える．

2･2 動作分析システム Frame-DIAS

動作分析には2次元/3次元ビデオ動作解析システム Frame-DIAS を使用する．このシステムでは各時刻のビデオ画像からマーカの画面上の位置を数値化する．この作業のことをデジタイズといい，ユーザーにとってはメインの作業になると思われる．本システムのデジタイズでは，マウスを用いたマニュアル式と自動追尾式の2つのモードを用いてデジタイズすることができる．また，デジタイズ作業によって得られた数値のノイズ成分をカットするための平滑化処理 (フィルタ処理) が行える．そして，デジタイズ作業によって得られた数値データを基にして

- スティックピクチャの表示
- ポイント毎の変位，仮想点の変位，重心の変位の速度・加速度・累積移動距離の計算
- 任意の2ポイント間の相対変位，相対速度，相対加速度の計算
- 関節角度，角速度，角加速度の計算
- 各セグメントの座標軸との傾き角度，角速度，角加速度の計算
- 重心から得られる力，パワー，運動量，エネルギーの計算
- 関節トルクの計算
- AD変換データとの同時呈示
- 床反力ベクトルとの同時呈示

といったパラメータ類の算出を行うことが可能である．

手動デジタイズでは，ユーザーが画像内のマーカの位置に合わせてクリックすることによってポイントを指定する．これを一つの動画分，コマごとに行わなければならないので時間がかかる．一方，自動デジタイズは，画像内のマーカを自動追尾し，コンピュータがポイントの指定を自動で行う．時間もかからずに楽であるが，マーカが身体に隠れてしまった場合など途中でマーカを識別できない状態になると，エラーメッセージとともに自動デジタイズが中断される．実際にユーザーがデジタイズを行う際は，マーカが追尾できるまで自動デジタイズ，コンピュータが認識できず自

動追尾できないときは手動デジタイズ，というようにこれら2つを併用する．図2に具体的なFrame-DIAS systemでのデジタイズのフローを示す．

図2　デジタイズのフローチャート

表2　一回目の実験の誤差 [cm]

パターン	X	Y	Z
A	0.391	0.468	0.533
B	1.090	0.547	1.195
C	0.320	0.432	0.200
D	1.021	0.344	0.481

表3　二回目の実験の誤差 [cm]

パターン	X	Y	Z
A	0.425	0.461	0.438
B	0.760	0.469	0.598
C	0.365	0.299	0.372
D	0.974	0.507	0.501

図3　キャリブレーションを行った4パターン

3.　キャリブレーションの精度確認

実際に撮影する際，挙動するであろう空間を定義して，その空間を数値化しておく必要がある．この空間の定義をキャリブレーションという．床にポイントを仮想し，それらを繋ぐことで長方形や正方形を作成する．これがX，Y方向の空間となる．さらに何点かのポイントがついたキャリブレーションポールを立てることによりZ方向の空間（高さ）の定義を行う．また，カメラでその空間を撮影して床のポイント間の距離とキャリブレーションポールのポイント間の距離をコンピュータ上で数値化する．これにより，コンピュータ上で空間が定義される．精度実験として，実測値とコンピュータで計算された距離の誤差を評価する実験を行った．床のポイントの数やキャリブレーションポールのポイントの数により誤差がどのように変化するのかを調べた．

図3のように，キャリブレーションのパターンとして今回は4パターンの実験を行った．実験は日を変えて二回行った．キャリブレーションポールを持つ人は二回とも同じ協力者である．以下に各パターンにおける誤差の算出結果を示す．

二回の実験とも結果の傾向は似たものとなっており，パターンB，パターンDは比較的誤差が大きくなっており，パターンCやパターンAの誤差が小さいことがわかる．このことから，キャリブレーションのポイント数が多いほうが誤差が大きくなるということが考えられる．実際，結果には示していないが床のポイントを九か所にしてキャリブレーションを行ったが，誤差が小さくなることはなかった．従って，実験を行っていく際にはパターンAまたはパターンCでのキャリブレーションが適切だと言える．

4.　腕の挙動

人間の挙動を測定する実験を行った．まず，測定に関して，比較的大きな空間での動作測定と，比較的小さな空間での動作測定を行った．比較的小さな空間で行った動作測定について述べる．使用したキャリブレーションのパターンはパターンAであり，狭い撮影空間に合わせて小さなキャリブレーションセットを作成した．測定した動作は，回内・回外と伸展・屈曲運動である．初期の姿勢は図4のとおりである．

実験では初期姿勢から，

●腕を外側にねじりながら伸展させる

●初期姿勢となるように内側にねじりながら屈曲させる

測定に必要なマーカは，手首の両端に二個，また肘の両端

に二個の計四個を用いた.

図 4　初期姿勢

以下に，この運動を解析した結果を示す.
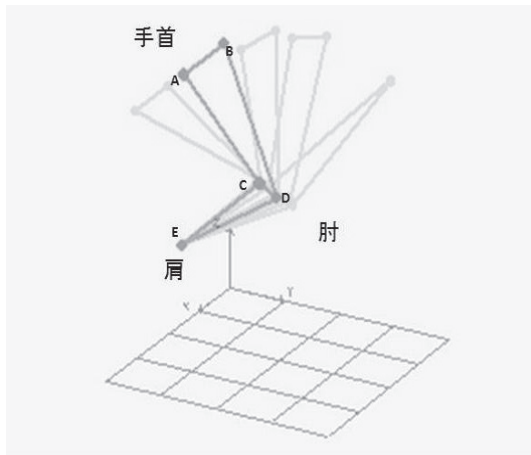
図 5　スティックピクチャ

図 5 はスティックピクチャである．マーカ同士を繋いで線を定義しておき，直観的にわかりやすく動きを見ることができる．今回，肩の中心位置にコンピュータ上で仮想点 E を作成し，E と肘のマーカ C，D とを結んで，スティックピクチャを作成した．撮影動画と比較したところ，スティックピクチャでは実際に行った腕の動きを再現できていることを確認した.

次に，回内・回外角度の解析結果を示す．図 6 は回内・回外の回転の角度である．これは直線 C-D を基準とした直線 A-B の偏角を示している.

図 7 は腕の伸展・屈曲角度である．これは直線 E-D 位置を基準とした直線 D-B の偏角である．初期姿勢では肘をほぼ直角に曲げているのでグラフは 90 度あたりを示している．それから徐々に腕を伸ばすにつれて直線 E-D と直線 D-B は平行に近づきグラフの値は小さくなっており，また腕を曲げることで 2 つの直線の偏角が大きくなっていることが読み取れる．回内・回外，伸展・屈曲を組み合わせた動きが計測できることが確認できた.
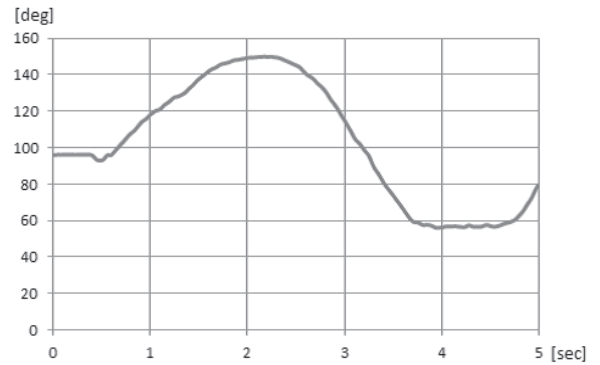
図 6　回内・回外運動
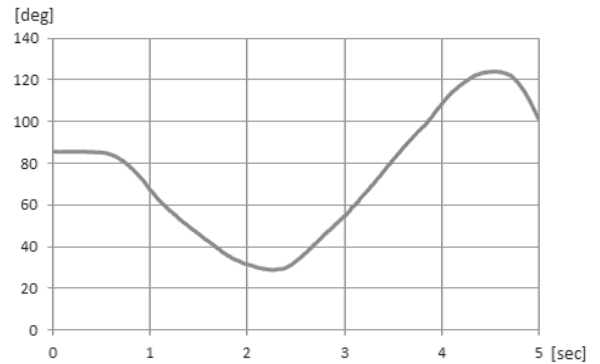
図 7　伸展・屈曲運動

5. 車椅子走行時の腕の挙動

比較的大きな空間での動作測定として，車椅子走行時の腕の挙動の測定を行った．キャリブレーション方法はパターン A を用いた．動作としては，車椅子に乗って直進するという単純な動作である．マーカは肩，肘，手首，拳（指第三関節付近）の四か所を両腕にそれぞれ取り付けた．また，車椅子の走行速度測定のために，両車輪の中心部にそれぞれ一か所ずつマーカを取り付けた．図 8 は取り付けて走行している様子である.

動作空間としては，床に一辺 1.83[m] の正方形，高さは 1.8[m] までのほぼ立方体のような空間を仮想している．この正方形の対角線を真っ直ぐ進むように車椅子を走行させた.

腕をリンクとみなし，右腕の肩から肘までを右腕リンク 1，肘から手首までを右腕リンク 2，また左腕の肩から肘までを左腕リンク 1，肘から手首までを左腕リンク 2 とした.

今回解析した内容は，スティックピクチャ作成と，両車輪の移動速度算出，4 つのリンクのそれぞれの絶対座標系 Z 軸との偏角算出である．以下に解析結果を示す.

図 10 は，右車輪の速度が実線であり，左車輪の速度が破線となっている．これを見ると，速度は大まかには両車輪

図 8　車椅子動作実験
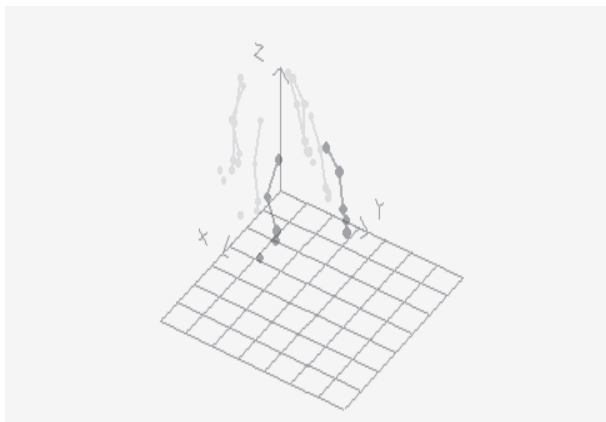
図 9　車椅子走行時の腕のスティックピクチャ
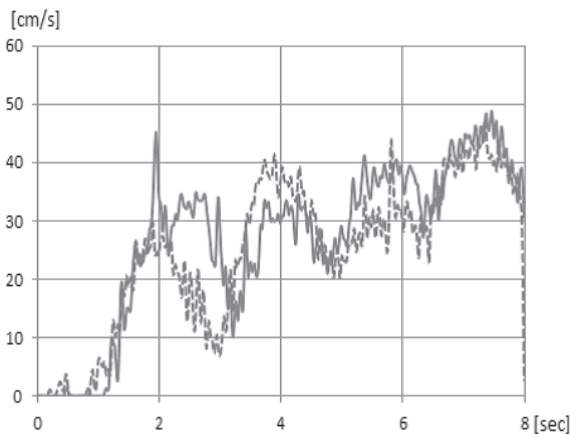
図 10　両車輪の移動速度

で同様に上昇しているが，右車輪の速度のグラフに少しノイズがみられる．これは，停止状態がらゆっくり車椅子を走行させせようとすると，車輪がふらふらと不安定になってしまうことによる右車輪のぶれが原因だと考えられる．

図 11 と図 12 を見比べてみると，同じような値を示している．これより，肩から肘にかけてのリンク 1 の動作は直進の際は両腕に大きな違いはないとわかる．また，綺麗な
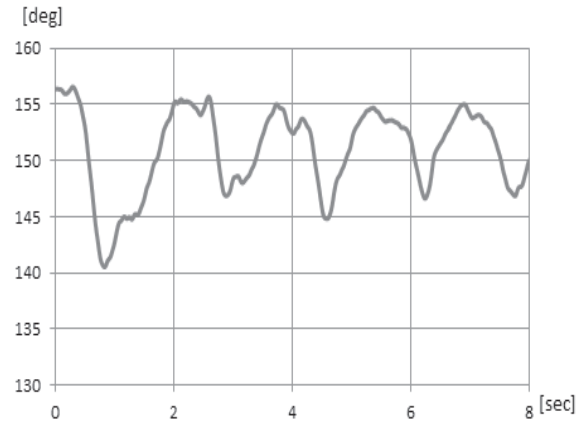
図 11　右腕リンク 1 の Z 軸との偏角
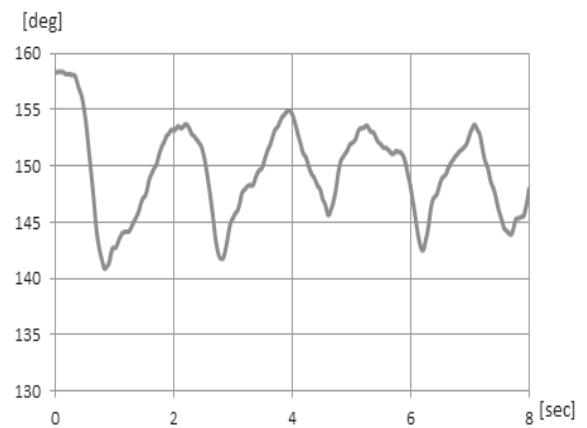
図 12　左腕リンク 1 の Z 軸との偏角

グラフの山が 5 個あり，この測定中，8 秒間で 5 回漕いだことが推測できる．
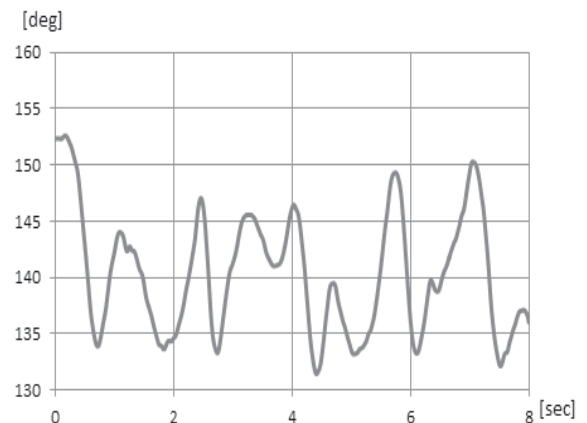
図 13　右腕リンク 2 の Z 軸との偏角

図 13 と図 14 は各腕のリンク 2 の偏角である．図 14 が図 11 や図 12 と同様にグラフにある 5 回の山をはっきりと確認できるのに対し，図 13 では山がいくつか確認するこ
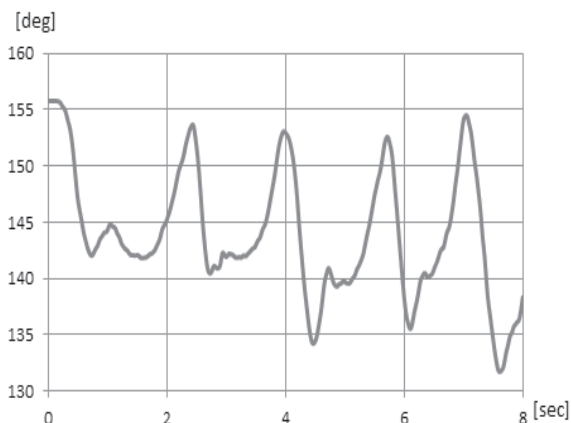
図 14　左腕リンク 2 の Z 軸との偏角

とが難しい．

この原因としては，先述したとおり右車輪のふらつきがに右腕の漕ぎ方に影響を与えたせいであると考えられる．また，図 11 にはふらつきの影響が見えないことから，リンク 2 はリンク 1 に比べて車椅子走行時に大きく動作していることが考えれる．

6.　モーションキャプチャシステムを用いた授業展開

制御情報システム工学科のカリキュラムには，”バイオメカニクス”と”ソフトコンピューティング”の 2 つのコースが設置されている．

”バイオメカニクス”コースには 5 年次通年選択科目”バイオメカニクス”を設置しており，力学，信号処理，計測工学，画像処理工学や制御工学などの科目で習得した知識を基に，生体の運動や機構のからくりを理解し，さまざまな分野で応用できることを目的としている．”バイオメカニクス”は 2 単位の 1 年通年科目であるため，1 コマ 50 分の授業を全 60 コマ実施する．表 4 に授業時数と実施するテーマについて示す．

表 4　”バイオメカニクス”の授業内容

授業時数（コマ数）	テーマ
2	バイオメカニクス概論
4	運動学と力学
8	生体運動器の構造と機能・特性
6	生体の運動学，静力学・動力学
10	生体の運動制御機構，運動学習
16	生体運動の計測と処理
10	生体運動の分析と評価
4	発育・発達，加齢 運動傷害，リハビリテーション

前期 30 コマでは，生体運動を理解および応用するために必要な理論に関する授業を実施し，生体機構や運動を工学分野へ応用することを想定してロボットなどの実機実験を通して理解の定着を図る．後期 30 コマでは，生体運動の計測，解析および評価手法の理解と実践をテーマとしている．各分野において，生体運動を応用するために，まず対象とする運動を把握する必要があり，さまざまな運動計測技術について研究および開発がなされてきた．そこで，計測，処理，分析と評価までの流れを体験し，各段階で使用されている技術や理論を学習する．

後期に実施する生体運動の把握では，加速度センサなどを搭載したモーションセンサと本稿で取り上げたシステムの 2 つを用い，それぞれの方法の原理や特徴などを比較しながら実習する．

後期 30 コマある授業の中で 10 コマを使用し，表 5 に示した授業時数および内容を実施する予定である．

表 5　映像を用いた生体の動作分析

コマ数	テーマ	内容
1	モーションキャプチャ	概要、技術・研究動向
3	映像からの動作分析法	2 次元・3 次元 DLT 法など
2	生体運動の計測	キャリブレーション，動作計測（歩行，投げなど）
4	生体運動の分析と評価	デジタイズ，動作分析・評価

生体運動の実習においては，本授業を選択した学生を一組三名ほどの小グループに分け，各組で対象とする運動を決定し，動作計測から評価まで PBL 方式で実施する．

7.　結　　論

本稿では，制御情報システム工学科で行う授業や研究で利用するモーションキャプチャシステムによる動作分析の事例を紹介した．

まず，キャリブレーションボールの数量および設置位置の違いによる計測精度の検証を行った．これにより，授業や研究で想定される計測対象の動作範囲において妥当なキャリブレーション手法を取得できたと考える．また，仰臥位における前腕の回内・回外および肘関節の屈曲・伸展を計測し，スティックピクチャによる動作確認と各関節角度の算出を行った．上肢の 3 次元動作に対して，Bcam で取得した動画と目視によって比較した結果，ほぼ同様の関節角度を得ることができた．次に，車椅子動作時の上肢の関節角度および車椅子の移動速度を算出した．両者とも動画との比較により，ほぼ妥当な値を得ることができた．

今後の課題として，ゴニオメータなどのセンサを用いて，デジタイズにより得られた結果と定量的な比較を行う必要がある．

5 年次通年開講科目”バイオメカニクス”で，本システムを活用したカリキュラムについて紹介したが，本システムを積極的に当学科の授業および研究に活用することで，より良い教育・研究環境を整備することが期待される．

（平成 23 年 11 月 9 日受付）

文　　献

（1）　(株)DKH　FlameDIAS 取扱説明書
（2）　http://www.motion-capture.jp/process/index.html